

CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE SECADO EN CAPA DELGADA DEL PEREJIL.

A. Lema, M. Pontin, A. Sanmartino, M. Ziletti, M. Martinello
Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería
Ruta Nacional 36 Km. 601, (5800) Río Cuarto – Córdoba, Argentina
Tel. +54 (358) 467 6488 - Fax +54 (358) 467 6246 . E-mail alema@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: El objetivo de este trabajo fue estudiar la cinética de secado en capa delgada para hojas y tallos de perejil bajo diferentes condiciones de temperatura del aire de secado (35°C, 45°C, 55°C y 65°C) y a una velocidad fija de $1.0 \text{ m/s} \pm 0.1$. Se realizaron experiencias en un equipo de secado de laboratorio diseñado y construido para tal fin. Se testearon doce modelos matemáticos teóricos empíricos para ajustar los datos experimentales. Un análisis de regresión no lineal fue usado para determinar las constantes de los modelos evaluados. Si bien a cada temperatura existió un modelo diferente que optimizaba el ajuste, el modelo de Midilli – Kucuk, describió más adecuadamente la cinética de secado en el rango de temperaturas estudiado. Sobre la base de estas experiencias, se evaluaron modelos de solución para la ley de Fick, determinándose una relación para la difusividad efectiva. La difusividad efectiva mostró una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura, permitiendo de este modo obtener un valor aceptable para la energía de activación.

Palabras clave: secado en capa delgada, cinética de secado, secado de perejil, difusividad efectiva, energía de activación.

INTRODUCCION

El perejil se considera usualmente como una especia. Si bien existen muchas variedades de perejil, la más cultivada es la “*petroselinum crispum*”, conocida comunmente como de hoja crespada. Crece en Europa y Asia como planta salvaje. La hierba tanto fresca como seca, se utiliza extensamente como condimento en diversos productos alimenticios a causa de su olor aromático de gran alcance (Díaz-Maroto et al., 2003). El perejil cultivado como especia se produce en la huerta doméstica. Es una fuente muy rica de las vitaminas C y E, caroteno, tiamina y minerales orgánicos (Soysal, 2004). Debido a su alto contenido en agua (78-82%), el perejil se seca ordinariamente para el mercado, de modo de inhibir el crecimiento de microorganismos y prevenir la degradación debido a reacciones bioquímicas.

El secado es uno de los más viejos métodos de preservación de alimentos y representa un aspecto muy importante de la transformación de los mismos. El secado solar es una alternativa cuando el costo del proceso juega un papel fundamental en la rentabilidad de la actividad productiva. Se hace imprescindible entonces, una tecnología que permita reducir los costos de operación si se quiere obtener una ganancia neta aceptable. En el secado solar, la utilización de secaderos con diseños apropiados puede disminuir los costos de producción en comparación a otras tecnologías. En relación con el secado al sol por exposición directa del producto, un diseño de secadero adecuado puede reducir en un 65% el tiempo de secado (Ait Mohamed et al, 2004) y además la calidad del producto seco es mejorada en términos de higiene, humedad final controlada, color, textura y aroma (Adom et al., 1997 y Midilli, 2001). Los secaderos solares de bajo costo destinados al secado de hierbas aromáticas, utilizan frecuentemente cubiertas plásticas negras, de modo de preservar el color del producto seco (Pontin et al., 2005).

A los fines de realizar un diseño eficiente de un secadero de alimentos, es ventajoso disponer un estudio minucioso de las condiciones de operación, teniendo en cuenta las características deseadas en el producto final. Los modelos usados para simular la cinética del secado también pueden ser usados para diseñar unidades nuevas así como para controlar y optimizar unidades ya existentes (Karathanos y Belessiotis, 1999), por esta razón la cinética de secado debe estar bien definida o de lo contrario es necesario disponer de modelos confiables.

Existen trabajos y estudios experimentales sobre las características de secado de numerosos productos vegetales basados en el proceso de capa delgada para el ajo (Madamba et al., 1996), pimienta roja (Doymaz y Pala, 2002), berenjena (Akpınar y Bicer, 2004 y Ertekin y Yaldiz, 2004), brócoli (Simal et al., 1998) y cebolla (Sarsavadi et al, 1999) entre otros, pero no se han encontrado estudios de cinética de secado para perejil en condiciones de secado solar, esto es temperaturas bajas entre 35°C y 65°C y velocidades de aire de aproximadamente 1 m/s.

Durante el desarrollo de este trabajo se realizaron experiencias de secado en capa delgada para diferentes condiciones de temperatura del aire de secado (35, 45, 55 y 65°C) y a una velocidad superficial media de aire de secado de 1 m/s, a partir de las cuales se estudió la cinética de secado. Las curvas presentaron un período de velocidad decreciente, y no se observó el período de velocidad constante. Debido a las características del perejil se consideró que en el período de velocidad decreciente la humedad se dirige hacia la superficie, predominantemente por difusión molecular a través del medio poroso. Por este motivo, el estudio cinético fue realizado por medio de un modelo difusional que describiera el comportamiento del secado del perejil.

La validez del modelo fue evaluada usando el coeficiente de correlación ajustado (r^2 ajust), el chi cuadrado (χ^2) y la raíz cuadrada del error Standard (RMSE) como criterios estadísticos de ajuste, encontrándose que el modelo de Midilli – Kucuk representa bien la cinética de secado estudiada. Sobre la base de estas experiencias, se determinaron valores de difusividad efectiva, los cuales mostraron una dependencia tipo Arrhenius con la temperatura y se calculó la energía de activación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sustrato

En el desarrollo de este trabajo las muestras utilizadas para el secado fueron hojas con porciones de tallo de perejil fresco (*Petroselinum crispum*) provenientes de la cosecha de plantines disponibles en el predio del laboratorio de Energía Solar de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto. La humedad inicial de las muestras en base húmeda fue del 80,1%, mientras que el contenido final de humedad varió entre 12% y el 15%.

Descripción del equipo utilizado

El equipo utilizado para desarrollar las experiencias de secado en capa delgada fue diseñado por nuestro grupo de trabajo. La geometría y dimensiones del mismo se presentan en la figura 1. En la figura 2 se muestra una fotografía del mismo. Es básicamente un sistema de calentamiento de aire. La muestra es retenida sobre una malla fina que se ubica en la última porción del equipo. El caudal de aire es regulado por un autotransformador que se conecta al ventilador. Un quemador de gas, permite la combustión del gas propano envasado al mezclarse con la corriente de aire frío produciendo gases de combustión (CO_2 y H_2O) a las temperaturas deseadas. El secado de la muestra se produce por contacto con la corriente de gases calientes.

Los materiales utilizados fueron caños de chapa galvanizada de 10 cm de diámetro y 1 m de longitud. Para los empalmes de los mismos se utilizaron codos y bridas. La malla que retiene la muestra es de acero inoxidable, 12 cm de diámetro y un tamaño de grilla de 1 mm.

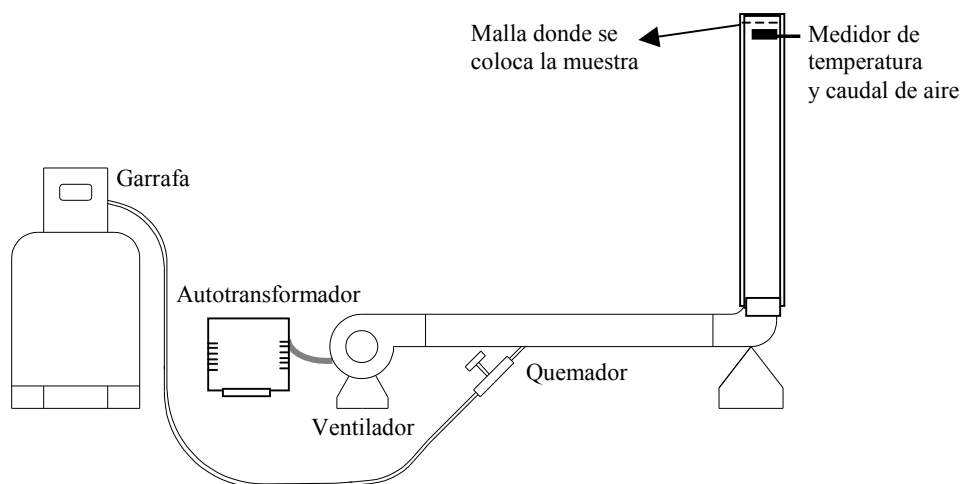


Figura 1 Diseño del equipo de secado en capa delgada



Figura 2 Fotografía equipo de secado en capa delgada
Condiciones de proceso en el desarrollo de las experiencias

Las condiciones bajo las cuales se realizaron las experiencias se muestran en la Tabla 1. El Tiempo de secado, hace referencia al tiempo que transcurre desde que se inicia el secado hasta que se alcanza la humedad de equilibrio.

Medio de secado	Aire caliente
Temperatura ambiente (°C)	12 – 18 (rango de variación)
Humedad relativa ambiente (%)	33 – 60 (rango de variación)
Temperatura del aire en la superficie inferior de la malla (°C)	35 - 45 - 55 - 65
Velocidad del aire (m/s)	1.0 ± 0.1
Masa de la muestra (g)	1,8 – 2,4 (rango)
Tiempo de secado (min)	120 - 350
Contenido inicial de humedad de la muestra en base húmeda	≈ 80,1%

Tabla 1. Condiciones de proceso en el desarrollo de las experiencias

La determinación de la humedad de las muestras se realizó por secado en estufa a 90°C, durante 24 hs. Las muestras fueron previamente molidas hasta lograr los requerimientos establecidos en la norma IRAM 15 850-1. Bajo estas condiciones de trabajo, al cabo de 20 hs de permanencia en la estufa, las muestras ya secas alcanzaban peso constante. Para cuantificar la masa húmeda o seca, se utilizó una balanza analítica marca Ohaus con una precisión de 0.001g.

La velocidad y la temperatura del aire en la superficie inferior de la malla se midió mediante un medidor de flujo de paletas marca Prova AVM07. La temperatura y la humedad relativa del aire ambiente fue registrada en forma automática mediante un termoanemómetro marca ALNOR CompufLOW Model 8575, el cual provee temperatura y humedad relativa del aire ambiente.

Formulación matemática

La relación de humedad definida por $RH = (X_i - X_E) / (X_0 - X_E)$, a propuesta de algunos autores (Günhan et al., 2005), (Midilli y Kucuk, 2003), (Togrul y Pehlivan, 2003), (Yaldiz y Ertekin, 2001), fue reducida a la expresión matemática:

$$RH = X / X_0 \quad (1)$$

debido a la fluctuación continua del aire de secado durante el transcurso de las experiencias. Siendo X_i la humedad instantánea en la observación i , X_E la humedad de equilibrio y X_0 la humedad inicial, todas ellas calculadas en base seca.

La velocidad de secado se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$dX/dt = \Delta X / \Delta t \quad (2)$$

siendo $\Delta X = X_{i+1} - X_i$ y $\Delta t = 5$ min.

Las curvas de secado fueron ajustadas con 12 modelos diferentes propuestos por diferentes autores (Midilli A. et al, 2002), (Akpınar et al., 2004), (Ertekin y Yaldiz, 2004), (Günhan et al., 2005), (Togrul y Pehlivan, 2003) y (Yaldiz y Ertekin, 2001) los cuales se muestran en la Tabla 2

Número asignado al modelo	Nombre del modelo matemático	Expresión matemática
1	Newton	$RH = \exp(-kt)$
2	Page	$RH = \exp(-kt^n)$
3	Page Modificado	$RH = \exp(-(kt)^n)$
4	Henderson y Pabis	$RH = a \exp(-kt)$
5	Logaritmico	$RH = a \exp(-kt) + C$
6	Dos términos	$RH = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
7	Dos términos exponenciales	$RH = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
8	Wang y Singh	$RH = 1 + at + bt^2$
9	Aproximación de difusión	$RH = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
10	Henderson Modificado y Pabis	$RH = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
11	Verma y otros	$RH = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
12	Midilli - Kucuk	$RH = a \exp(-kt^n) + bt$

Tabla 2: Modelos matemáticos seleccionados para describir el secado en capa delgada para el perejil

El análisis de regresión fue realizado mediante un programa de computación utilizando matlab 6.5. Para evaluar el ajuste de los modelos matemáticos propuestos con los datos experimentales, se realizó un análisis de regresión no lineal, y se calcularon los siguientes estadísticos: el coeficiente de correlación ajustado (r^2), el chi cuadrado reducido (χ^2) y la raíz cuadrada del error Standard (RMSE). Altos valores para r^2 y bajos para χ^2 y RMSE corresponden a un buen ajuste. Los estadísticos se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$R^2_{ajus} = \frac{\sum_{i=1}^N (RH_i - RH_{pred,i}) \cdot \sum_{i=1}^N (RH_i - RH_{exp,i})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (RH_i - RH_{pred,i})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (RH_i - RH_{exp,i})^2 \right]}} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (RH_{exp,i} - RH_{pred,i})^2}{N - z} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RH_{pred,i} - RH_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

donde $RH_{exp,i}$ y $RH_{pred,i}$ son las relaciones de humedad experimental y predicha por los modelos respectivamente, N es el número de observaciones y z el número de constantes de secado.

RESULTADOS

Características del secado del perejil

Los datos experimentales obtenidos a partir de las experiencias de secados fueron volcados en los gráficos que se presentan en las figuras 3 y 4, como era de esperar, la temperatura del aire de secado es un parámetro efectivo en la reducción sustancial del tiempo de secado, debido que al aumentar la temperatura del aire, la relación de humedad se modifica (RH).

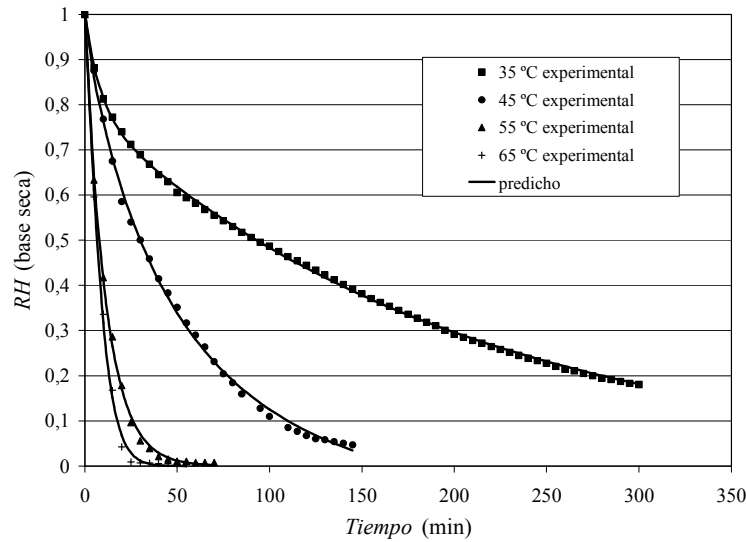


Figura 3 Gráfico de la velocidad de secado vs. tiempo a diferentes temperaturas

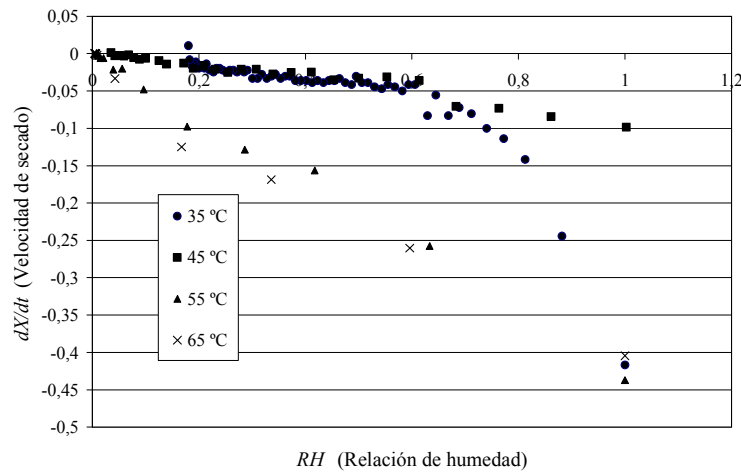


Figura 4 Gráfico de la velocidad de secado vs. la relación de humedad a diferentes temperaturas

Ajuste de las curvas de secado utilizando los modelos matemáticos

Los datos del contenido de humedad en base seca para diferentes temperaturas del aire de secado se convirtieron en la relación de humedad (RH) definida por la ecuación 1 y luego se ajustaron utilizando los modelos mostrados en la tabla 2. Los resultados de los análisis estadísticos se muestran en la tabla 3.

La comparación de los valores r^2 ajus y de χ^2 de los doce modelos demostró que a cada temperatura el mejor ajuste fue dado por modelos diferentes, los cuales se indican en negrita en la Tabla 3.

Mo d.	T.	Constantes del modelo	SSE	r^2 ajus.	χ^2	RMSE
1	35	$k=0.0067$	0.2263	0.8995	0.0038	0.0614
	45	$k=0.0221$	0.0112	0.9941	$4.15 \cdot 10^{-04}$	0.0204
	55	$k=0.0883$	0.0012	0.9990	$8.36 \cdot 10^{-05}$	0.0091
	65	$k=0.1175$	0.0078	0.9922	$7.05 \cdot 10^{-04}$	0.0266
2	35	$k=0.0347$; $n=0.6723$	0.0179	0.9919	$3.01 \cdot 10^{-04}$	0.0174
	45	$k=0.0308$; $n=0.9158$	0.0056	0.9969	$2.16 \cdot 10^{-04}$	0.0147
	55	$k=0.0859$; $n=1.0104$	0.0011	0.9989	$8.84 \cdot 10^{-05}$	0.0094
	65	$k=0.0681$; $n=1.2270$	0.0020	0.9977	2.0510^{-04}	0.0143
3	35	$k=0.0067$; $n=0.6723$	0.0179	0.9919	$3.01 \cdot 10^{-04}$	0.0174
	45	$k=0.0224$; $n=0.9158$	0.0056	0.9969	$2.16 \cdot 10^{-04}$	0.0147
	55	$k=0.0881$; $n=1.0104$	0.0011	0.9989	$8.84 \cdot 10^{-05}$	0.0094
	65	$k=0.1120$; $n=1.2270$	0.0020	0.9977	$2.05 \cdot 10^{-04}$	0.0143
4	35	$a=0.8422$; $k=0.0054$	0.0412	0.9814	$6.99 \cdot 10^{-04}$	0.0264
	45	$a=0.9614$; $k=0.0211$	0.0071	0.9961	$2.75 \cdot 10^{-04}$	0.0166
	55	$a=0.9990$; $k=0.0882$	0.0012	0.9988	$8.90 \cdot 10^{-05}$	0.0095
	65	$a=1.0193$; $k=0.1194$	0.0073	0.9919	$7.33 \cdot 10^{-04}$	0.0271
5	35	$a=0.7666$; $k=0.0071$; $c=0.1025$	0.0328	0.9849	$5.66 \cdot 10^{-04}$	0.0238
	45	$a=0.9608$; $k=0.0212$; $c=0.0012$	0.0071	0.9959	$2.85 \cdot 10^{-04}$	0.0169
	55	$a=1.0001$; $k=0.0877$; $c=-0.0017$	0.0012	0.9988	$9.59 \cdot 10^{-05}$	0.0098
	65	$a=1.0311$; $k=0.1142$; $c=-0.0153$	0.0061	0.9924	$6.78 \cdot 10^{-04}$	0.0260
6	35	$a=0.7890$; $k_0=0.0049$; $b=0.2090$; $k_1=0.1175$	0.0011	0.9995	$1.86 \cdot 10^{-05}$	0.0043
	45	$a=0.9131$; $k_0=0.0201$; $b=0.0905$; $k_1=0.1699$	0.0037	0.9978	$1.56 \cdot 10^{-04}$	0.0125
	55	$a=-1.0340$; $k_0=0.0678$; $b=2.0299$; $k_1=0.0768$	0.0010	0.9988	$9.41 \cdot 10^{-05}$	0.0097
	65	$a=-3.7392$; $k_0=0.0752$; $b=4.7512$; $k_1=0.0826$	0.0039	0.9945	$4.85 \cdot 10^{-04}$	0.0220
7	35	$a=0.1542$; $k=0.361$	0.0790	0.9643	0.0013	0.0366
	45	$a=0.4870$; $k=0.0327$	0.0084	0.9954	$3.24 \cdot 10^{-04}$	0.0180
	55	$a=1.3072$; $k=0.0951$	0.0011	0.9989	$8.37 \cdot 10^{-05}$	0.0092
	65	$a=1.7547$; $k=0.1579$	0.0024	0.9973	$2.39 \cdot 10^{-04}$	0.0155
8	35	$a=-0.0063$; $b=1.2598 \cdot 10^{-05}$	0.2456	0.8891	0.0042	0.0645
	45	$a=-0.0164$; $b=0.0001$	0.0685	0.9623	0.026	0.0513
	55	$a=-0.0456$; $b=0.0005$	0.1422	0.8601	0.0109	0.1046
	65	$a=-0.0596$; $b=0.0008$	0.1132	0.8743	0.0113	0.1064
9	35	$a=2.1687$; $k=0.0072$; $b=0.9970$	0.2493	0.8854	0.0043	0.0656
	45	$a=4.1745$; $k=0.0218$; $b=1.0002$	0.0115	0.9934	$4.58 \cdot 10^{-04}$	0.0214
	55	$a=2.5827$; $k=0.1003$; $b=1.0898$	0.0011	0.9988	$9.01 \cdot 10^{-05}$	0.0095
	65	$a=6.6807$; $k=0.1859$; $b=1.1078$	0.0021	0.9974	$2.35 \cdot 10^{-04}$	0.0153
10	35	$a=0.2206$; $k=0.1038$; $b=0.0603$; $g=0.0046$; $c=0.7150$; $h=0.0046$	0.0087	0.9958	$1.58 \cdot 10^{-04}$	0.0126
	45	$a=0.2000$; $k=0.0377$; $b=0.4643$; $g=0.0196$; $c=0.3911$; $h=0.0197$	0.0339	0.9778	0.0015	0.0393
	55	$a=0.0312$; $k=1.3483$; $b=1.9977$; $g=0.0721$; $c=-1.0289$; $h=0.0618$	9.0410^{-04}	0.9987	$1.00 \cdot 10^{-04}$	0.0100
	65	$a=4.8156$; $k=0.0614$; $b=1.8983$; $g=0.0295$; $c=-5.7079$; $h=0.0435$	0.0018	0.9964	$3.04 \cdot 10^{-04}$	0.0174
11	35	$a=2.8534 \cdot 10^{05}$; $k=6.5771 \cdot 10^{-04}$; $g=6.5771 \cdot 10^{-04}$	0.2281	0.8951	0.039	0.0627
	45	$a=0.9142$; $k=0.0201$; $g=0.1678$	0.0337	0.9979	$1.50 \cdot 10^{-04}$	0.0122
	55	$a=0.9779$; $k=0.0880$; $g=0.1012$	0.0012	0.9988	$9.78 \cdot 10^{-05}$	0.0099
	65	$a=2.8534 \cdot 10^{05}$; $k=0.1952$; $g=0.1952$	0.0021	0.9974	$2.35 \cdot 10^{-04}$	0.0153
12	35	$a=1.0016$; $k=0.0637$; $n=0.4952$; $b=-0.0006$	0.0018	0.9992	$3.14 \cdot 10^{-05}$	0.0056
	45	$a=1.0026$; $k=0.0387$; $n=0.8416$; $b=-0.0003$	0.0030	0.9982	$1.25 \cdot 10^{-04}$	0.0112
	55	$a=0.9966$; $k=0.0845$; $n=1.0156$; $b=1.1985 \cdot 10^{-05}$	0.0011	0.9987	$1.03 \cdot 10^{-04}$	0.0102
	65	$a=0.9964$; $k=0.0671$; $n=1.2325$; $b=8.246 \cdot 10^{-06}$	0.0020	0.9971	$2.54 \cdot 10^{-04}$	0.0160

Tabla 3 Determinación de las constantes de los Modelos matemáticos seleccionados para describir el secado en capa delgada para el perejil

Sin embargo, si consideramos el conjunto total de datos, el modelo de Midilli Kucuk ofreció los mejores valores para los estadísticos de selección, proporcionando el mejor ajuste. La figura 5 muestra los cocientes de la humedad experimentales (RH_{exp}) y predichos por el modelo de Midilli -Kucuk (RH_{pred}).

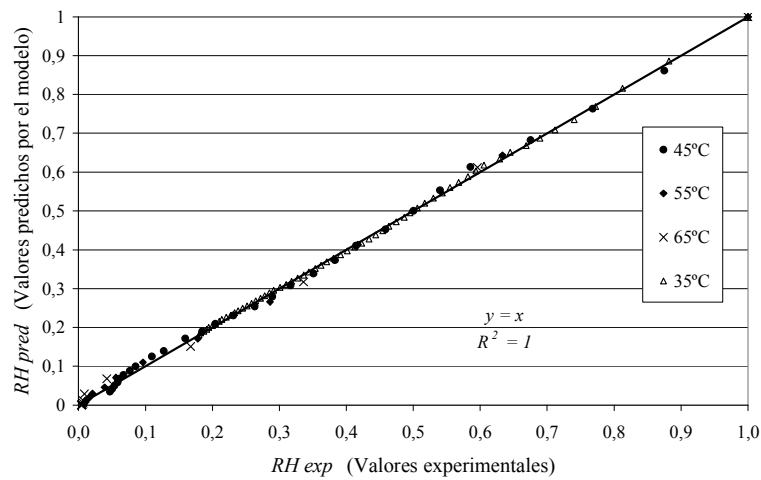


Figura 5 Gráfico de la relación de humedad experimental (RH_{exp}) vs. la predicha por el modelo Midilli -Kucuk (RH_{pred})

Calculo de la difusividad efectiva y de la energía de activación

Los resultados obtenidos muestran que la resistencia interna a la transferencia de masa controlan la operación de secado debido a la presencia de un periodo de velocidad decreciente solamente (figura 4). Por lo tanto, estos resultados pueden ser interpretados utilizando la ley de difusión de Fick. A continuación se lista la solución de esta ecuación bajo diferentes hipótesis (Gerla et al, 2005):

<u>Caso I</u>		
Dist. de humedad superficial uniforme		$RH = \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4)$
Encogimiento despreciable		
Difusividad efectiva constante		
Interfase en condición de equilibrio		
<u>Caso II</u>		
Dist. de humedad superficial uniforme		$RH = \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 \left(1 + \left(\frac{D_{eff} t}{L^2}\right)^{\beta} - 1\right)}{4\beta}\right) \quad (5)$
Encogimiento despreciable		
Difusividad efectiva variable		
Interfase en condición de equilibrio		
<u>Caso III</u>		
Dist. de humedad superficial uniforme		$RH = \left(\frac{\tan \alpha}{\alpha}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\alpha D_{eff} t}{L^2}\right) + \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)}{(2n+1)^2 \left[1 - (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4\alpha}\right]} \quad (6)$
Difusividad efectiva constante		
Encogimiento despreciable		
Concentración superficial variable		

Tabla 4 Soluciones de la Ley de Fick, para diferentes hipótesis de trabajo

donde, D_{eff} es la difusividad efectiva (m^2/min), L es la mitad del espesor de la lámina a secar (m) (bajo la hipótesis de una lámina infinita), y n es un número entero positivo. Simplificando las ecuaciones 4, 5 y 6 al primer término de la solución de la serie, se obtuvieron tres modelos, que fueron ajustados mediante un análisis de regresión no lineal. Se utilizaron los estadísticos descritos en las ecuaciones 3, 4 y 5, para evaluar el ajuste de los modelos. En la tabla 5, se presentan los resultados obtenidos.

Caso	T	Constantes del modelo	SSE	$r^2_{ajus.}$	χ^2	RMSE
I	35	$D_{eff}/L^2 = 0.0021$	0.0661	0.9947	0.0011	0.0335
	45	$D_{eff}/L^2 = 0.0087$	0.0828	0.9967	0.0032	0.0564
	55	$D_{eff}/L^2 = \text{-----}$	-----	-----	-----	-----
	65	$D_{eff}/L^2 = \text{-----}$	-----	-----	-----	-----
II	35	$D_{eff}/L^2 = \text{-----}; \beta = \text{-----}$	-----	-----	-----	-----
	45	$D_{eff}/L^2 = \text{-----}; \beta = \text{-----}$	-----	-----	-----	-----
	55	$D_{eff}/L^2 = 0.059; \beta = 27.9541$	0.0988	0.9028	0.0076	0.0872
	65	$D_{eff}/L^2 = 0.062; \beta = 40.2768$	0.0747	0.9170	0.0075	0.0864
III	35	$D_{eff}/L^2 = \text{-----}; \alpha = \text{-----}$	-----	-----	-----	-----
	45	$D_{eff}/L^2 = \text{-----}; \alpha = \text{-----}$	-----	-----	-----	-----
	55	$D_{eff}/L^2 = 0.1724; \alpha = 0.6157$	0.0076	0.9926	$5.816 \cdot 10^{-04}$	0.0241
	65	$D_{eff}/L^2 = 0.2407; \alpha = 0.5807$	0.0033	0.9963	$3.304 \cdot 10^{-04}$	0.0182

Tabla 5 Determinación de las constantes de los modelos matemáticos seleccionados para describir la difusividad efectiva

El modelo que mejor ajustaba a cada temperatura fue señalado en negritas en la Tabla 5. A partir de los valores del parámetro D_{eff}/L^2 obtenidos para 35, 45, 55 y 65 °C, pudo observarse que la relación D_{eff}/L^2 aumentaba con el incremento de temperatura, lo cual sugirió utilizar una ecuación tipo Arrhenius para modelar el efecto de la temperatura en la difusividad efectiva como sigue:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273,15)}\right) \quad (7)$$

o de manera equivalente, utilizando la ecuación 8:

$$\frac{D_{eff}}{L^2} = \frac{D_0}{L^2} \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273,15)}\right) \quad (8)$$

siendo D_0 es el factor de Arrhenius (m^2/s), E_a es la energía de activación para la difusión de la humedad (kJ/mol), R es la constante universal de los gases ($kJ/mol K$) y T es temperatura del aire de secado ($^{\circ}C$).

En la figura 6, se graficó $\ln D_{eff}$ vs. $(1/T+273,15)$ observándose que los valores obtenidos ajustan adecuadamente con una recta, lo cual permite calcular la energía de activación a partir del valor de la pendiente (ecuación 8).

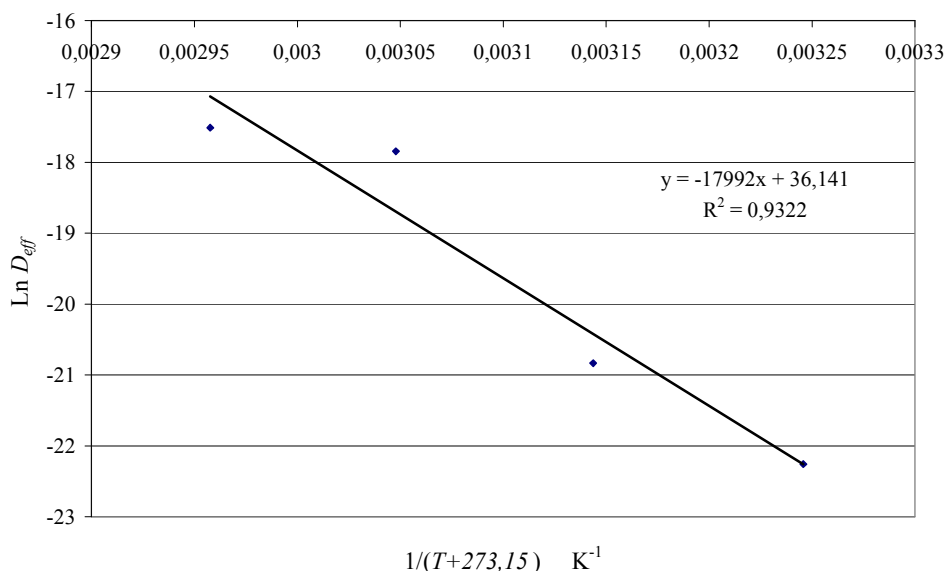


Figura 6. Gráfico de $\ln D_{eff}/D_0$ vs. $(1/T+273,15)$ de acuerdo a una expresión tipo Arrhenius

El valor de la E_a para perejil fue de 149 kJ/mol , y es del orden de los propuestos por algunos autores para otros alimentos: 110.5 kJ/mol para el secado manzana (Senadeera et al., 2003), 26.2 kJ/mol para el secado del brócoli (Simal et al., 1998) y 35.43 kJ/mol para el secado de arvejas (Doymaz, 2005).

CONCLUSIONES.

A partir del estudio descrito en el presente trabajo sobre la cinética de secado para el perejil, es posible concluir que el equipo de laboratorio construido a tal fin, permite trabajar en condiciones de flujo cruzado con velocidad y temperatura del aire de secado propias del secado solar.

Como era de esperar, en la figura 4, se muestra notablemente el efecto significativo de la temperatura del aire de secado sobre la velocidad del secado, como así también la ausencia de un período de velocidad constante, lo cual induce a pensar que el mecanismo controlante de la operación de secado es resistencia interna a la transferencia de masa.

En la figura 5, se observa que el proceso de secado ocurre completamente en el período de velocidad decreciente,

De los modelos propuestos para describir la cinética de secado, el de Midilli Kucuk dio el mejor ajuste.

De acuerdo a los valores mostrados en la Tabla 5, es posible concluir que la difusividad efectiva es función del contenido de humedad y de la temperatura. Mientras que para bajas temperaturas varía con el logaritmo de la relación de humedad (RH) a mayores temperaturas esta funcionalidad se vuelve más compleja.

Se determinó un valor para la energía de activación del perejil (149 kJ/mol), el cual permite calcular la difusividad efectiva en función de la temperatura para una ecuación tipo Arrhenius.

REFERENCIAS

- Ait Mohamed L., Kouhila M., Jamali A., Lahsasni S., Kechaou N., Mahrouz M., (2005). Single drying behaviour of Citrus aurantium leaves under forced convection. *Energy, Conversion & Management* 46, 1473-1483.
- Adom K.K., Dzogbefia V.P. y Ellis W. O. (1997). Combined effect of drying time thickness on the solar drying of okra, *Journal of the Science of Food and Agriculture* 73, pp. 315-320.
- Akpınar E.K. y Bicer Y. (2004). Modelling of the drying of eggplants in thin-layer, *International Journal of Food Science and Technology* 39 (2004), pp. 1-9.
- Crank J., (1975) *The mathematics of diffusion* (2nd ed.), Clarendon Press, Oxford, London.
- Díaz-Maroto M.C., Vinas M.A.G. y Cabezudo M.D. (2003). Evaluation of the effect of drying on aroma of parsley by free choice profiling, *European Food Research Technology* 216 (2003), pp. 227-232.
- Doymaz I. y Pala M., (2002). Hot-air drying characteristics of red pepper, *Journal of Food Engineering* 55 (2002), pp. 331-335.
- Ertekin, C y Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359.
- Gerla, P., Martinez Garreiro, Zecchi, Berta, Clavijo, L. (2005) Modelling vacuum and convective dehydration of vegetables. "4º Mercosur Congress on Process Systems Engineering" (Enpromer). Agosto 2005. Village Rio das Pedras - Rio de Janeiro- Brasil. http://www.enpromer2005.eq.ufjf.br/nukleo/pdfs/0730_paper_730.pdf
- Günhan, T., Demir, V., Hancioglu, E. y Hepbasli, A. (2005) Mathematical modeling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46x(11-12), 1667-1679.
- Midilli A., (2001). Determination of pistachio drying behaviour and conditions in solar drying system, *International Journal of Energy Research* 25, pp. 715-725.
- Midilli A. y Kucuk H. (2003). Mathematical modelling of thin layer drying of pistachio by using solar energy *Energy Conversion and Management*, 44, 1111-1122.
- Midilli A, Kucuk H, Yapar Z., (2002). A new model for single layer drying. *Drying Technology* 2002, 20(7), 1503-1513.
- Madamba P.S., Driscoll R.H. y Buckle K.A., (1996) Thin-layer drying characteristics of garlic slices, *Journal of Food Engineering* 29, pp. 75-97.
- Pontin M., Lema A., Ritta R., Sanmartino A., Ghirardotto M. (2005). Secadero solar para frutas – Estudio de caso. *Avances en Energías Renovables*. Vol. 9 pag. 02-43 02-48
- Sarsavadia P.N., Sawhney R.L., Pangavhane D.R. y Singh S.P., (1999). Drying behaviour of brined onion slices, *Journal of Food Engineering* 40, pp. 219-226.
- Senadeera W., Bhandari B.R., Young G. y Wijesinghe B., (2003). Influence of shapes of selected materials on drying kinetics during fluidized bed drying, *Journal of Food Engineering* 58, pp. 277-283.
- Simal S., Rosselló C., Berna A. y Mulet A., (1998). Drying of shrinking cylinder-shaped bodies, *Journal of Food Engineering* 37 pp. 423-435.
- Soysal Y., (2004). Microwave drying characteristics of parsley, *Biosystems Engineering* 89 pp. 167-173.
- Togrul, I. y Pehlivan, D. (2003) Modeling of drying kinetics of single apricot. *Drying Technology*, 19, 583-596.
- Yaldiz, O. y Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 63, 349-359.

ABSTRACT

In this paper the effect of temperature on drying rate for parsley was studied. Experiences at constant air velocity (1 ± 0.1 m/s) and several temperatures (35°C, 45°C, 55°C and, 65°C) were made in a laboratory equipment specially designed and constructed for this purpose. The drying process took place in the falling rate period, the drying data were fitted using twelve different thin-layer drying models. The performance of the models was investigated evaluating the goodness of fit. Among the models, the drying model developed by Midilli & Kucuk showed good agreement with the data. According to the experiences, models of solution for the Fick law were investigated, an expression for the diffusion coefficient was obtained. The diffusion coefficient showed an Arrhenius-type temperature dependence. This behavior allowed to obtain an acceptable value for the activation energy.

Keywords: thin-layer drying models, kinetic of drying, drying of parsley, effective diffusivity, energy of activation